# IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS INTELIGENTES DE COMUNICACIÓN Y CONTROL GENERANDO NUEVAS SOLUCIONES EN AUTOMATIZACIÓN Y SISTEMAS DE DOMÓTICA E INMÓTICA

Freddy A. Leal González, Marlon M. Hernández Cely

***Resumen*— El estudio e implementación de sistemas domóticos e inmóticos utilizando protocolos inalámbricos inteligentes de comunicación y sistemas automáticos de bajo costo, nos permiten dar soluciones de control. Dentro de estos protocolos podemos encontrar el *Zigbee* que se utiliza para controlar sin restricciones en distancias y cantidad de instrumentos. Por medio de este control inalámbrico proporcionado por el protocolo *Zigbee* en conjunto con dispositivos programables como: controladores lógicos programables o PLC (*Programmable Logic Controller)*, los arreglos de compuertas programables de campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*), microcontroladores, etc. Se pueden tomar las variables para controlar el confort, seguridad y entretenimiento en el hogar y la industria, aportando nuevas soluciones al área de domótica e inmótica en el contexto actual de automatización. En este artículo se presentan un prototipo basado en elementos programables con el fin de utilizar técnicas de control digital y módulos de comunicación zigbee para realizar una red de elementos que conformen un sistema complejo.**

***Palabras claves*— domótica, inmótica, protocolos inalámbricos, *Zigbee*, automatización, instrumentación.**

## I. INTRODUCCIÓN

La domótica y la inmótica, nos presentan una gran variedad de aplicaciones que buscan la comodidad de los usuarios que habitan o laboran en instalaciones con este tipo de tecnologías. Aunque los estudios sobre este sector de la ingeniería iniciaron hace más de dos (2) décadas, se apreciar poco nivel de implementación debido a diferentes factores, entre estos están: poca experiencia en empresas instaladoras, ausencia de normativa, excesiva tecnología en mercado, inexistencia de recomendaciones, desconocimiento de ventajas del usuario, poca información por promotor y alto coste de la tecnología.

El estudio de la domótica desde un punto de vista socio-cultural y como necesidad para el control eficiente de los recursos con los que contamos, como parte de la solución del ahorro energético y asociado al confort de cada individuo en su hogar; ha tomado fuerza en los últimos años en países como España que ya cuentan con leyes que buscan incentivar el desarrollo de estas tecnologías [1][2].

La tecnología *Zigbee* por otra parte, como una posible solución a las comunicaciones en hogares y edificios ya construidos nos presentan grandes ventajas [3].

En los últimos años se han presentado varios trabajos basados en tecnologías de comunicación utilizando identificación de radio frecuencia (RFID, *Radio Frecuency IDentification*). En distintos trabajos se pueden apreciar aplicaciones para la tecnología RFID en procesos donde se requiera el transporte de la información [4][5]. En 2010 se presenta el trabajo "Diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo para los equipos de laboratorio mediante RFID" que utilizaba una combinación entre el protocolo *Zigbee* y el protocolo TCP/IP [6]. Actualmente empresas reconocidas como *Siemens* y *Schneider* entres otras, promueven equipos electrónicos que permiten comunicaciones inalámbricas de corta distancia basados en *Zigbee* dando solución a problemáticas en la industria, la domótica y la inmótica.

En este artículo se implemento de un prototipo de bajo costo que permite demostrar su aplicabilidad y funcionalidad en sistemas complejos, de igual modo su adaptabilidad a las diferentes tecnologías que se encuentran en el mercado. El prototipo basado en microcontroladores nos permite demostrar la utilidad de elementos de control digital como lo son: los controladores lógicos programables o PLC (*Programmable Logic Controller)*, los arreglos de compuertas programables de campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*), dispositivos lógicos programables complejos (CPLD, *Complex Programmable Logic Device*), los microcontroladores y los sistemas computacionales, entre

Artículo recibido el 3 de Febrero de 2011.

F.A.L.G. Y M.M.H.C. están con la Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería, Plan de estudio de ingeniería Electrónica, Grupo de Investigación en Automatización y Control (GIAT). Cúcuta, Norte de Santander, Colombia Tlf. (7) 5776655 E-mail: freddy.alejandro.leal@hotmail.com, Marlon25_3@hotmail.com.

otros. Con elementos de comunicaciones inalámbricas de bajo costo como lo es *Zigbee* basado en el estándar IEEE 802.15.4.

## II. PROTOCOLO *ZIGBEE*

*Zigbee* es un protocolo de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.4, creado por *Zigbee Alliance*, *Zigbee* permite comunicaciones inalámbricas de bajo consumo, especialmente útil para redes de sensores en entornos industriales, médicos y domóticos.

Las comunicaciones *zigbee* se realizan en la banda libre de 2,4 GHz, cuenta con 16 canales, el alcance varía entre los 30 metros máximos en interiores y 100 metros en exteriores, la transmisión de datos es de 256Kbps, y puede contener hasta 65535 dispositivos. Tiene como ventajas: el bajo coste, bajo consumo de potencia, uso de banda de radio libre y sin necesidad de licencia, instalación económica y simple, redes flexibles y extensible.

El protocolo *zigbee* permite desde reemplazar un cable por una comunicación serial inalámbrica, hasta el desarrollo de configuraciones punto a punto, punto a multipunto, *peer to peer* (todos los nodos conectados entre sí) o redes complejas de sensores.

La red *zigbee* está formada básicamente por tres (3) elementos, un único dispositivo coordinador, dispositivos *router* y dispositivos finales (*end points*). Una de las mayores aportaciones del protocolo *zigbee* y el que mayor interés despierta, es el concepto de la red nodal o *mesh network* por el que cualquiera dispositivo pueda conectar con otro, utilizando varios dispositivos como repetidores. En la Fig. 1 se aprecia diferentes topologías de redes disponibles en *zigbee* [7] .

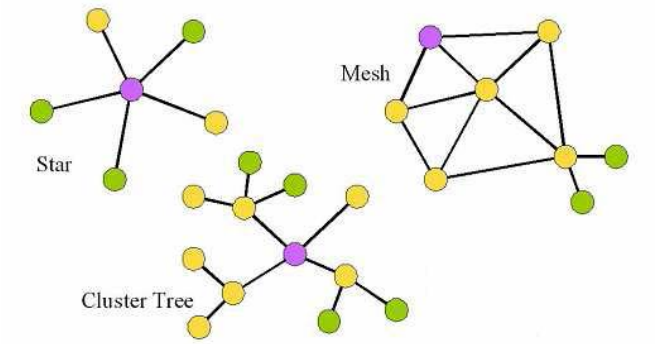


FIG. 1. TOPOLOGÍAS DE REDES DISPONIBLES EN *ZIGBEE*.

De lo anterior podemos describir algunas características en la implementación de tecnologías de comunicaciones basadas en el protocolo *Zibgee*:

- *ZigBee* opera en las bandas libres industrial, científica y médica (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*)
- No se ve afectado por redes *WiFi* o *Bluetooth*.
- Cada red *ZigBee* tiene un identificador de red único.
- Es un protocolo de comunicaciones multi-salto.
- Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps.
- Cobertura de 10 a 100 metros.

*Zigbee* aunque comparte los rangos de frecuencia, con el estándar *WiFi* (IEEE 802.op11) y *Bloetooth* (IEEE 801.15.1) no debería verse afectado por este tipo de comunicaciones debido a su distribución de canales, zigbee cuenta con 16 canales de 5 MHz. En la figura 2 se muestra las diferentes canales se muestra los diferentes canales utilizados por la estándares 802.15.4 (*zigbee*), 802.11b/g (*Wifi*) y 802.15.1 (Bluetooth) [8].

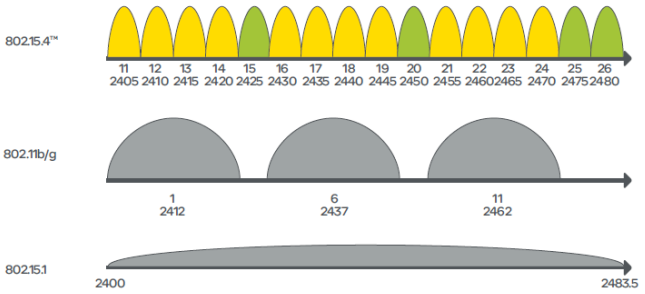


FIG. 2. DISTRIBUCIÓN DE CANALES EN LA BANDA DE 2.4 GHZ DE LA TECNOLOGÍA ZIGBEE, BLUETOOTH Y WIFI.

*Zigbee* utiliza para el empaquetamiento de los datos cuatro (4) deferentes tipos de paquetes, estos son: datos, ACK, baliza y MAC. El paquete de datos tiene la carga de datos que pueden ser hasta 104 bytes, el paquete ACK o paquetes de reconocimientos el cual confirma que el paquete se ha recibido sin errores, el paquete baliza se recarga del control a distancia y la configuración de los dispositivos y/o nodos, por otra parte el paquete MAC utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, el cual especifica 4 servicio de seguridad:

- Control de acceso
- Datos de encriptación
- Integración de tramas
- Secuencia de refresco

Lo anterior tomado del documento "El Estándar Inalámbrico *Zigbee*" de Valverde Rebaza Jorge Carlos [7].

## III. SISTEMAS DE CONTROL EN LA DOMÓTICA Y LA INMÓTICA

En las instalaciones de domótica y de inmótica se utilizan elementos similares a los utilizados en los sistemas de automatización e instrumentación, en estos sistemas contamos con sensores que nos indican el estado en tiempo real de las condiciones necesarias para la toma de decisión y la manipulación de actuadores; los actuadores permiten manipular ciertas variables para el control de procesos como los son la climatización, la ambientación y los sistemas de alerta.

De lo anterior se puede decir que: "los sistemas domóticos e inmóticos tienen elementos y condiciones similares a los procesos de control clásicos como los son el control de lazo abierto y lazo cerrado"; los sistemas de control utilizados en la domótica y la inmótica son por lo general basados en lógicas digitales, las cuales permiten realizar múltiples procesos de control utilizando un único dispositivo.

Entres los controladores disponibles se encuentran: controladores lógicos programables, microcontroladores, dispositivos FPGA y CPLD, sistemas computarizados entre

otros. Estos dispositivos tienen diferentes ventajas y desventajas, entre las más significativas se encuentran el precio de implementación, la dificultad al instalarlos y la aplicación que se desea desarrollar, por lo que, se recomienda estudiar detenidamente estos detalles antes de iniciar algún tipo de trabajo como el descrito en este articulo.

## IV. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO, PRUEBAS Y RESULTADOS

En la figura 3, se presenta el diagrama de bloques del prototipo implementado, este prototipo está conformado por una placa de circuito impreso o PCB (*printed circuit board*) que corresponde a la parte superior de la imagen, y un sistema remoto que funcionan como mando para el usuario final, este control de usuario permite libertad de controlar los actuadores según el usuario lo desee permitiendo desde tomar lectura de las condiciones ambientales, acceder al sistema de seguridad, realizar pruebas de señales sonoras, visuales y modificar condiciones como la iluminación por sectores.

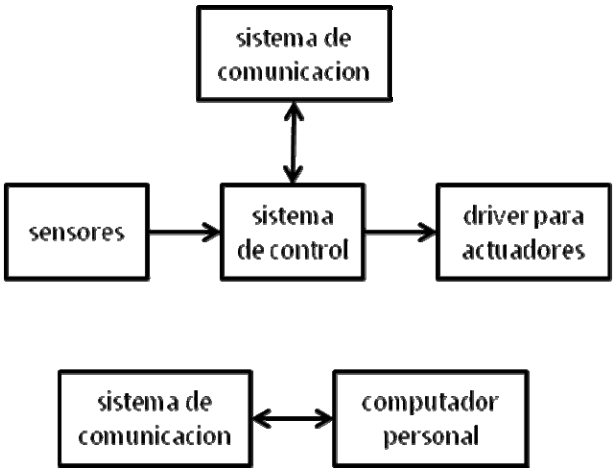


FIG. 3. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROTOTIPO IMPLEMENTADO.

El prototipo se implemento en un PCB realizado de manera manual, lo que deja sujeto a la reducción del prototipo significativamente si se utilizase procesos automatizados. La PCB tiene la capacidad de comunicarse, tomar decisiones de acuerdo a su programación teniendo en cuenta las señales indicadoras proveniente de los sensores y manipular actuadores externos.

### A. *Sistema de comunicación*

Los módulos *Xbee* producidos por la compañía *MaxStream* permiten la implementación de comunicaciones inalámbrica utilizando el protocolo *Zigbee*. En la Fig. 4, se aprecia un modulo *Xbee* PRO que permite la fácil instalación en PCB [9].

FIG. 4. MODULO XBEE PRO.

*Idigi International Inc*. Desarrollo el *software* X-CTU utilizado para la configuración de los módulos Xbee y es distribuido de manera gratuita en su página oficial. El X-CTU es utilizado principalmente para programar los módulos variando las características de los registros de identificación y direccionamiento, puede ser utilizado como el *hyperterminal* de Windows y nos permite realizar pruebas de señal a los dispositivos que conforman la red *Zigbee*. En este artículo se utilizo la programación de la memoria no volátil, esto se realiza utilizando la opción "*Modem Configuration*" en el X-CTU. Este tipo de configuración resulta ideal para este tipo de aplicaciones debido a la imposibilidad de programar los módulos con instrucción desde los sistemas de control.

El X-CTU permite configurar los módulos *Xbee* en modo "API" o en modo "AT o transparente". El modo API presenta una dificultad en el manejo de los datos, aunque reduce la electrónica y las interconexiones entre dispositivos aumentan el nivel de programación en el control, por sus características los módulos *end devise* o dispositivo final cuentan con la capacidad de pasar a un estado inactivo en donde el consumo de energía es mínimo, de igual modo tiene la capacidad de utilizar los puertos de entradas análogas, entradas digitales, salidas digitales y salidas con modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse-width modulation*). El modo AT por otra parte tiene mayor simplicidad en su funcionamiento ya que el modulo solo transmite información que es ingresada por el pin *Din* (*Pin 3*) y entrega toda la información por el *pin Dout* (*Pin* 2) que recibe por RF. El modo AT es para este prototipo la primera opción por la forma de manejar la información, aunque no se descarta la aplicación del modo API para prototipos futuros que permitan aumentar la capacidad de dispositivos conectados sin aumentar la complejidad del hardware de control.

Para la configuración de una red en modo AT se debe asignarse el *pan id* en todos los módulos que componen la red. Los registros *Destination Address High* (DH) *Destination Address Low* (DL) son los registros que indican la dirección destino década modulo Xbee. Los registros *Serial Number high* (SH) y *Serial Number low* (SL) son los registros de identificación de cada modulo, utilizando estos dos registros podemos direccionar una comunicación entre los módulos que

el diseñador considere necesario. Para la programación de los dispositivos se debe seleccionar un modulo central para ser programado como *Coordinador AT* y los demás como *Router/End Device AT.*

Después de instalados los módulos Xbee y configurados correctamente, el software X-CTU nos permite verificar el funcionamiento y la calidad de la comunicación. La opción *Range test*, nos permite enviar una trama de información para verificar la recepción de la misma trama, para esto el modulo receptor debe tener unido los pines *Dout* y *Din.*

### *B. Sistema de control*

Para la implementación de un prototipo se pensó en el diseño de una tarjeta estándar que permitiera el control de actuadores y sensores, pero con la capacidad de variar su programación, esto con el fin de comercialización a futuro de este tipo de tecnologías aplicadas a sistemas domóticos.

Entre los distintos tipos de dispositivos programables que se encuentran comercialmente, se optó por utilizar microcontroladores para el prototipo inicial, ciertos microcontroladores de gama media cuentan con prestaciones de comunicaciones seriales utilizando UART, variedad de puestos de entradas/salidas análogas y digitales entre otras. Además cuenta con la ventaja de tener software para su programación gratuita suministrados por los fabricantes.

Para la implementación del prototipo se utilizo un microcontrolador 16F877A. El código implementado para el control tiene como objetivo la lectura de sensores como: detectores de intrusos, sensores de temperatura, entre otros que el diseñador considere necesarios. El controlador también está programado para controlar los actuadores que en este caso son alarmas sonoras, control de iluminación y climatización. El programa desarrollado tiene funciones de sistema de seguridad, control ON/OFF de equipos, sistemas remotos y locales para el control manual del usuario. El código implementado utiliza aproximadamente un veinte-cinco por ciento (25%) de la memoria del microcontrolador esto permite hacer sistemas mucho más complejos o reducir el tamaño del microcontrolador con el fin de reducir la PCB en próximos prototipos.

### *C. Implementación*

El prototipo implementado en una PCB se muestra en la Fig.5, en donde se muestra dividida por recuadros de colores, el recuadro de color rojo encierra al modulo *XBee* instalado en la PCB encargado de la comunicación inalámbrica con otros módulos, el cuadro de color morado son 8 pines de salida conectados al microcontrolador utilizado para proporcionar control local del sistema de control por medio de un teclado matricial o juego de botones, el cuadro azul es el microcontrolador 16F877A encargado de realizar las técnicas de control programadas en este, el cuadro amarillo son cuatro (4) conectores utilizados para la conexión de sensores análogos o digitales, el cuadro verde es un puerto utilizado para el control driver y el manejo de actuadores utilizando comunicaciones en paralelo.

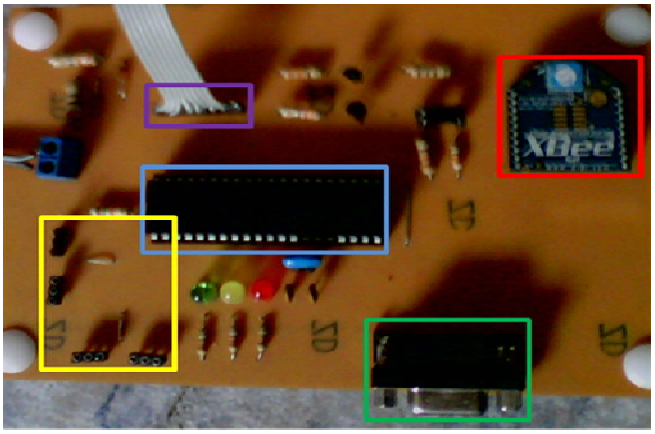


FIG. 5. IMAGEN DE LA PCB IMPLEMENTADA COMO CONTROL PARA SISTEMAS DOMÓTICOS.

En la Fig. 6 se muestra el esquematico de forma resumida (falta el circuito oscilador, el regulador de voltaje y secciones de acople e indicadoras) en donde se aprecean los elementos mas significativos del sismeta; del mismo modo a la figura 5, se aprecian las secciones separadas por cuadros de distintos colores como metodo descriptivo.

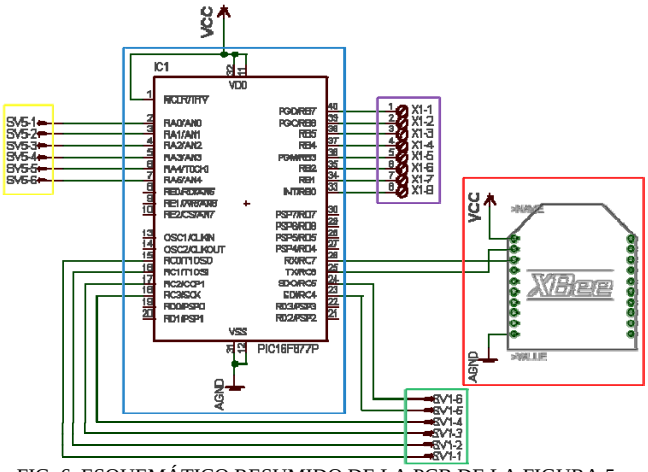


FIG. 6. ESQUEMÁTICO RESUMIDO DE LA PCB DE LA FIGURA 5.

El control cuenta con la capacidad para comunicarse con otros módulos por medio del XBee instalado en la PCB, El microcontrolador utiliza los pines destinados para la comunicación serial que cuentan con un transmisor-receptor asíncrono universal *(UART, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)* interno, estos pines se conectan a los pines *Dout* y *Dint* en el XBee. El XBee transmite la información recibida por el pin *Dint* hacia los otros módulos instalados en el rango de cobertura, y estos a su vez transmite la información a módulos más lejanos en caso de ser necesario. Por otra parte toda la información recibida por el modulo *XBee* es transmitida por el *pin Dout* hacia el dispositivo de control.

### *D. Resultados*

Se realizaron pruebas del prototipo con dos módulos XBee, la primera de ellas realizada con un modulo XBee conectado al computador por medio del "*Explorador XBee"*, el cual se

conecta al puerto USB. En esta prueba se verifica el control manual proveniente de dispositivos remotos conectados a un computador con su respectiva interfaz de usuario para el fácil control del sistema domótico (lectora de estado, control de sistemas de seguridad, activación y desactivación de actuadores).

El segundo tipo de prueba fue realizada entre dos placas de control, con las cuales se verifico la confiabilidad de la comunicación. Con esta prueba se verifico la interconexión de actuadores y sensores aunque no estén conectados en la misma placa de control.

En estas dos pruebas se obtienen los resultados esperados y recomendaciones, de las cuales nos permite avanzar y realizar mayores trabajos con este tipo de tecnologías en busca de la optimización del sector de la domótica, utilizando tecnología económica y de instalación practica.

## V. CONCLUSIONES

Con la implementación de un prototipo inicial basado en comunicaciones inalámbricas Zigbee y sistemas de control digitales se obtuvo como resultado el éxito esperado, abriendo puertas a aplicaciones no solo en el área de la domótica y la inmótica, las áreas de la instrumentación, automatización y monitorización en aplicaciones medicas y sistemas de comunicaciones inalámbricas *indoor* (en interiores).

La implementación de tecnologías inalámbricas como Zigbee en Colombia presenta un costo elevado en relación a otros países, lo que dificulta la implementación a una escala comercial haciendo necesario un estudio más profundo en el ámbito económico que permita tomar una decisión sobre su viabilidad.

Cuando se desarrolla un prototipo de domótica y en general cualquier trabajo se tiene el inconveniente de que existe gran variedad de modelos y números de series que corresponden a los equipos que se pueden utilizar. Las especificaciones de los Xbee en particular deben ser precisas y estar acordes a su hoja de especificaciones; ya que la definición de registros de funcionamiento puede variar de un modelo a otro.

Zigbee puede funcionar en ambientes de alto trafico de comunicaciones inalámbricas, con alta confiabilidad debido al método de empaquetamiento y modo de transmisión, en situaciones de prueba se comprobó una eficiencia del cien por ciento (100%) en la resección de datos a una distancia de 25 metros en interiores y una interferencia electromagnética considerable.

Como recomienda como futuras investigaciones la creación de una interfaz de usuario que permita perfeccionar los estudios relacionados con este tema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Carlos Navares, **"Inmótica y eficiencia energética (gestión en tiempo real de las instalaciones),** director de redes avanzadas de comunicaciones y sistemas en tiempo real. 2008.

[2] Hugo Martín Domínguez y Fernando Sáez Vacas, **"Domótica: un enfoque sociotécnico**", Primera edición, E.T.S.I de telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. 2006.

[3] Jamie Furness, **"¿Tiene futuro zigbee?"**, Director global de desarrollo tecnológico de Farnell. 2008.

[4] Ernesto J, García Davis, **"Implementación de protocolos de transporte en redes de sensores",** Universidad Tecnológica de Catalunya. Julio de 2009.

[5] Dora María Ballesteros, Harvey Enrique Melo, Ascanio José Maya Quintero. **"Sistema de transmisión inalámbrica de señales ECG y de temperatura para ambientes hospitalarios (SINHO)"**. Revista de ingeniería biomédica, volumen 4. Grupo de investigación TIGUM, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. 2010.

[6] Leonardo Pedraza y Jefferson González, **"Diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo para los equipos de laboratorio mediante RFID",** Universidad Nacional de Colombia, Faculta de Ingenierías. 2010.

[7] Valverde Rebaza Jorge Carlos, **"El Estándar Inalámbrico Zigbee"**, Universidad Nacional de Trujillo, Perú. 2007.

[8] Schneider Electric. Zigbee, Setting Standards for Energy-Efficient Control Networks. 2011. Disponible en: http://www2.schneider-electric.com/documents/support/white-papers/40110601_Zigbee_EN.pdf

[9] Andrés Oyarse, **"Guia de Usuario, Xbee serie 1"**, Ingeniería MCI LTDA. 2010.